

Porównanie stosowania kolejek podwieszonych o napędzie akumulatorowym z kolejkami spalinowymi w podziemnych kopalniach węgla kamiennego

Comparison of using suspended monorails powered by internal combustion engines with electrically battery-powered monorails in hard coal mines



Nikodem Szlżzak^{*)}



Marek Korzec^{*)}

Treść: Transport materiałów oraz załogi stanowi ważne ogniwo w procesie produkcyjnym w każdym podziemnym zakładzie górniczym. Pogarszające się warunki klimatyczne związane głównie ze zwiększającą się głębokością eksploatacji oraz obecnością maszyn zmuszają do poszukiwania rozwiązań poprawiających sytuację. Istotnym czynnikiem pogarszającym warunki pracy są także substancje szkodliwe wydzielające się wraz ze spalinami z pracujących silników zasilanych olejem napędowym. W celu utrzymania stężeń gazów na odpowiednim poziomie bardzo często trzeba doprowadzić do miejsc ich pracy powietrze w ilości przekraczającej inne wymagania. Sposobem na rozwiązanie tych problemów może być zastąpienie kolejek podwieszonych spalinowych nowymi rozwiązaniami o napędzie elektrycznym, zasilanymi akumulatorowo. W artykule przeprowadzono analizę spalin kolejek pracujących w kopalni węgla kamiennego oraz określono wymagane strumienie powietrza pozwalające na utrzymanie dopuszczalnych stężeń czynników szkodliwych. Przeprowadzono także analizę porównawczą warunków klimatycznych w drążonym wyrobisku chodnikowym, uwzględniając funkcjonowanie wyrobiska z pracą kolejki spalinowej oraz pracą kolejki elektrycznej. Przeprowadzona analiza pozwoliła wskazać przyrosty ciepła w wyrobisku spowodowane pracą obu rozwiązań kolejek. Na podstawie wykonanych analiz stwierdzono, że stosowanie kolejek elektrycznych może w istotny sposób przyczynić się do poprawy warunków pracy w wyrobiskach.

Abstract: Materials and mine staff transportation is necessary during production process in underground mines. Worsening climatic conditions, related to the mining depth and the usage of machines, force us to look for solutions to improve the situation. Another essential factor connected with underground working conditions is harmful substances and exhaust fumes emitted from Diesel engines. For maintaining the gas concentration at the appropriate level it is necessary to supply air in quantities exceeding other requirements. Possible way to solve the problems is replacing suspended monorails powered by internal combustion engines with new solutions of electrically battery-powered monorails. In the article were performed the analyzes of the exhaust gas parameters from monorail locomotives operating in a hard coal mine and determines the required airflow to maintain permissible concentrations of harmful gases. I was also done a comparative analysis of climatic conditions in the development heading, considering the roadway's functioning with and without using Diesel or electric monorail. The obtained results showed that using electric monorails could significantly improve working conditions.

Słowa kluczowe:

górnictwo podziemne, warunki klimatyczne, stężenie gazów, strumień powietrza, kolejka podwieszona, maszyna elektryczna

Keywords:

underground mining, climatic conditions, gas concentration, airflow, suspended monorail, electric battery-powered monorails

^{*)} AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

1. Wprowadzenie

Prowadzenie wysokoefektywnej eksploatacji w kopalni jest niemożliwe bez zapewnienia odpowiedniej technologii wszystkich procesów towarzyszących. Realizacja takich działań jak transport materiałów, transport załogi, czy też wykonywanie działań pomocniczych w drażonych chodnikach oraz wyrobiskach przyścianowych w kopalniach węgla kamiennego stanowi ważny element procesu produkcyjnego. Od wielu lat w kopalniach bardzo popularnym środkiem transportu są kolejki podwieszane.

Kolejki podwieszane stanowią praktycznie najefektywniejszy środek transportu załogi i materiałów wyrobiskami górniczymi. Transport załogi do oddziałów przygotowawczych i wydobywczych znacząco się skraca oraz ogranicza się przy tym wydatek energetyczny pracowników związany z dotarciem do miejsca pracy. Kolejki pozwalają także na sprawny transport ciężkich materiałów oraz urządzeń. Dzięki nim urządzeń często nie trzeba demontować i mogą być transportowane w całości, w tym np. sekcje obudowy zmechanizowanej (Pieczora, Tokarczyk 2017). Zazwyczaj w kopalni pracuje od kilku do kilkunastu kolejek podwieszonych, ale są też kopalnie, które stosują jeszcze większą ich liczbę.

Dotychczas najszerzej stosuje się kolejki spalinowe zasilane silnikami Diesla. Do ich zalet należy duża mobilność i zasięg, gdyż posiadają one odpowiednie zbiorniki z zapasem paliwa. Główną ich wadą są natomiast kwestie związane ze spalaniem paliwa i emisją ciepła (jawnego i utajonego) oraz dodatkowo emisją spalin, zawierających w swoim składzie gazy szkodliwe (w tym toksyczne). Dlatego wymagane jest intensywne przewietrzanie wyrobisk, w których pracują. Emisja spalin zwiększa się w przypadku, gdy silnik ulega zużyciu i jego sprawność spada (Szlązak i in. 2014). Kolejki zasilane silnikami Diesla powodują pogorszenie warunków klimatycznych w wyrobiskach. Ma to istotne znaczenie w każdym wyrobisku, ale przede wszystkim w wyrobiskach kopalń, gdzie eksploatacja prowadzona jest na dużej głębokości i temperatura górotworu uzyskuje wysokie wartości. Ich negatywną cechą jest także generowanie hałasu (Pieczora, Suffner 2017).

Sposobem na poprawę warunków pracy w wyrobiskach może być stosowanie kolejek podwieszonych o napędzie elektrycznym. W przypadku kolejek elektrycznych pojawia się jednak problem podłączenia do sieci za pomocą kabla zasilającego, co zmniejsza ich zasięg i stanowi problem ruchowy. Lepszym rozwiązaniem eliminującym te problemy jest zastosowanie zasilania akumulatorowego. W tym rozwiązaniu niezbędne jest jednak zapewnienie miejsc ładowania akumulatorów wyposażonych w odpowiednią infrastrukturę ładowarek, aczkolwiek w najnowszych ciągnikach ten problem też został rozwiązany, gdyż ładowanie akumulatorów jest realizowane bezpośrednio z kopalnianej sieci elektroenergetycznej o napięciu 500 V. Kolejki podwieszane zasilane silnikami elektrycznymi z akumulatorów posiadają więc wiele zalet, które sprawiają, że takie maszyny coraz częściej znajdują zastosowanie w kopalniach.

W artykule przedstawiono analizę porównawczą pracy kolejek spalinowych i elektrycznych w wyrobiskach podziemnych kopalń węgla kamiennego, którą przeprowadzono dla wyrobiska z wentylacją lutniową. To właśnie w wyrobiskach przewietrzanych wentylacją odrębną występują największe trudności z zapewnieniem odpowiedniej jakości i parametrów termodynamicznych powietrza. W analizie uwzględniono przede wszystkim wpływ pracy kolejki na warunki klimatyczne, w tym temperaturę i wilgotność powietrza, ale także emisję zanieczyszczeń do atmosfery kopalnianej. W ramach artykułu skupiono się na wybranym przypadku wyrobiska

korytarzowego, drażonego w trudnych warunkach klimatycznych. Szersza analiza zagadnienia została przedstawiona przez autorów w artykule (Szlązak i in. 2022).

2. Charakterystyka kolejek podwieszonych do zastosowania w wyrobiskach podziemnych kopalń

Obecnie w kopalniach węgla kamiennego najpowszechniej stosuje się kolejki podwieszane z napędem spalinowym. Historia prac nad ciągnikami spalinowymi do kolejek podwieszonych sięga lat 70. XX wieku (Pieczora, Suffner 2017). Jednak rozwój stosowania kolejek podwieszonych z napędem spalinowym w polskich kopalniach węgla kamiennego nastąpił w połowie lat dziewięćdziesiątych XX. wieku. Aktualnie trudno jednoznacznie odpowiedzieć na pytanie, ile kolejek podwieszonych pracuje w polskich kopalniach. Pieczora i Suffner (2017) szacują jednak, że na koniec 2016 roku było to ponad 560 kolejek (ciągników) podwieszonych z napędem spalinowym. Wiodącymi dostawcami tych urządzeń są Becker-Warkop Sp. z o.o., Bevex, Famur S.A., Ferrit i Scharf.

Do głównych zalet, które wpłynęły na popularyzację stosowania kolejek podwieszonych należy zaliczyć (Fuksa i in. 2015):

- własne źródło zasilania i zapas paliwa,
- możliwość wielogodzinowej pracy dzięki odpowiedniemu zapasowi paliwa,
- możliwość transportu po nieograniczonej długości i rozgałęzionej trasie,
- możliwość ciągłej obserwacji trasy przez maszynistę,
- stosunkowo łatwe i szybkie wydłużanie lub skracanie trasy,
- łatwy załadunek i wyładunek,
- łatwość podwieszenia różnych ładunków,
- wysoką efektywność transportu dzięki dużej sile uciągu i możliwości przewożenia maszyn i urządzeń górniczych w całości,
- możliwość płynnej zmiany prędkości jazdy lokomotywy,
- możliwość dojazdu bezpośrednio do przodka wyrobiska chodnikowego oraz blisko skrzyżowania chodnika podścianowego i ściany.

Do podstawowych wad kolejek podwieszonych zasilanych silnikami spalinowymi należą natomiast emisja spalin zawierających szkodliwe gazy (trujące i duszące) oraz pyły zawieszane, jak również generowanie hałasu. Istotną wadą jest także emisja ciepła w postaci zarówno ciepła jawnego, jak i utajonego.

Większość stosowanych w kopalniach ciągników spalinowych kolejek podwieszonych posiada wysokoprężne, turbodoładowane silniki cztero- lub sześćo- cylindrowe, o pojemności skokowej około 4000-7000 cm³ i mocy od 80 kW do prawie 150 kW. Siłę uciągu maszyny zapewnia jeden silnik o określonej mocy. W czasie pracy takiego silnika spalane jest od 210 do około 260 g/kWh paliwa. Na biegu jałowym silniki posiadają obroty rzędu 800-900 obr/min, a obroty nominalne 2000-2600 obr/min. Prędkość ruchu kolejek podwieszonych zawiera się w przedziale 1,4-3,1 m/s, a w większości rozwiązań nie przekracza 2,5 m/s (Pieczora, Tokarczyk 2017). Podstawowe parametry kolejek o napędzie spalinowym przedstawione są w publikacjach (Szlązak i in. 2014; Pieczora, Suffner 2017; Pieczora, Tokarczyk 2017) oraz kartach katalogowych producentów, między innymi Becker-Warkop Sp. z o.o., Bevex, Famur S.A., Ferrit, Scharf.

Kolejki o napędzie spalinowym pobierają z wyrobiska powietrze, które po procesie spalania paliwa w silniku jest oddawane do wyrobiska za pośrednictwem układu wydechowego. Przy założeniu spalania paliwa w silniku z dwukrotnym

Tabela 1 Parametry techniczne kolejek spalinowych produkcji Becker-Warkop Sp. z o.o. (2022)
Table 1. Technical parameters of Diesel powered monorails manufactured by Becker-Warkop (2022)

Typ	Moc silnika	Wersja silnika	Liczba cylindrów	Pojemność skokowa	Max. siła uciągu jednego napędu	Obroty znamionowe	Spalanie paliwa
	kW			cm ³	kN		
KP-95	95	czterosuwowy wysokoprężny doładowany	4	4764	20 – napęd cierny	2300	229
KP-148	148				6		
			20 – napęd cierny				
					30 – napęd zębaty		

nadmiarem powietrza do spalania 1 dm³ oleju napędowego potrzeba około 30 m³ powietrza. W przypadku maszyn o mocy 80 kW będzie się to więc wiązać z potrzebą zapewnienia około 500 m³/h powietrza, a przy mocach rzędu 150 kW nawet 1200 m³/h powietrza. Strumień objętościowy generowanych do wyrobiska spalin będzie nieznacznie większy, co pokrywa się z danymi producentów kolejek podwieszonych i przy silnikach o mocy 150 kW przekracza 1400 m³/h. Podstawowe parametry ciągników kolejek spalinowych, w wykonaniu przeciwybuchowym, produkcji Becker-Warkop przedstawiono w tabeli 1.

W czasie pracy maszyny spalinowej dochodzi do emisji spalin zawierających szkodliwe gazy oraz części stałe. Wymagania stawiane maszynom spalinowym przeznaczonym do pracy w podziemnych wyrobiskach górniczych zostały określone w polskiej normie (PKN 1997). Zgodnie z jej zapisami silniki przeznaczone do górniczych pojazdów z napędem spalinowym do eksploatacji w wyrobiskach górniczych powinny być tak skonstruowane, aby zawartość substancji toksycznych w spalinach w żadnym ustalonym stanie pracy silnika nie przekraczała następujących wartości dopuszczalnych:

- tlenek węgla – 500 ppm;
- tlenki azotu – 750 ppm;
- węglowodory – 200 ppm;
- sadza – 3. stan zanieczyszczenia wg skali Boscha.

Stosowanie silników spalinowych o wyższych zawartościach substancji toksycznych w spalinach jest dopuszczalne pod warunkiem stosowania w układach wydechowych urządzeń obniżających zawartości tych substancji do wartości dopuszczalnych. Pomiary zawartości substancji szkodliwych w spalinach wykonywane są zgodnie z normą (PKN 1999). Norma ta precyzuje miejsca ich wykonywania oraz stosowane analizatory gazowe.

Firma Becker-Warkop udostępniła autorom wyniki analizy spalin nowych kolejek spalinowych, które zostały dysponowane do pracy w wyrobiskach górniczych. Analiza prowadzona była zarówno na obrotach biegu jałowego, jak również przy obrotach nominalnych. Temperatura spalin w czasie badań zmieniała się w zakresie 33,6-43,8°C, stężenie tlenu od 13,0% do 17,0% (większe przy obrotach biegu jałowego), stężenie dwutlenku węgla od 2,93% do 5,87% (większe przy obrotach nominalnych), stężenie tlenu węgla od 136 ppm do 242 ppm (większe przy obrotach nominalnych), stężenie tlenków azotu od 157 ppm do 219 ppm (większe przy obrotach biegu jałowego). Wykonane analizy spalin wykazują, że badane ciągniki kolejek z nadstatkiem spełniają wymagania normy (PKN 1997).

Zgodnie z aktualnymi przepisami (Rozporządzenie ... 2016) wszystkie dostępne wyrobiska i pomieszczenia przewietrza się w taki sposób, aby zawartość tlenu w powietrzu nie była mniejsza niż 19% objętościowo, a stężenie gazów w powietrzu było nie większe niż:

- 1% dla dwutlenku węgla;
- 0,0026% dla tlenku węgla (26 ppm);

- 0,00026% dla tlenku azotu (2,6 ppm);
- 0,000075% dla dwutlenku siarki (0,75 ppm);
- 0,0007% dla siarkowodoru (7 ppm).

Dodatkowo Rozporządzenie (Rozporządzenie ... 2016) określa, że w zakładach górniczych stosujących maszyny z napędem spalinowym, zawartość tlenków azotu określa się na podstawie stężenia dwutlenku azotu.

Spśród tlenków azotu zawartych w gazach spalinowych najbardziej niebezpieczny jest dwutlenek azotu, który jest gazem silnie toksycznym. Z pozostałych tlenków działanie drażniące ma również tlenek azotu, jednak jego wpływ na organizm ludzi jest dużo mniejszy. Poza tym ulega w powietrzu szybkiemu utlenianiu do dwutlenku azotu. W gazach spalinowych udział dwutlenku azotu w porównaniu do tlenku azotu wynosi 5-10%.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Rozporządzenie, 2018) od 21 sierpnia 2018 obowiązują obniżone stężenia dopuszczalne tlenków azotu. Aktualnie sektor górnictwa podziemnego i budownictwa tuneli jest w okresie przejściowym, w którym obowiązują jeszcze większe wartości dopuszczalnych stężeń, które obowiązywały przed wprowadzeniem zmian. Wejście w życie nowych przepisów, w dniu 21 sierpnia 2023 roku, spowoduje jednak, że kopalnie będą zmuszone do ograniczenia stosowania silników Diesla, bądź stosowania układów ograniczających emisję gazów szkodliwych do atmosfery. Drogą rozwiązania problemu może być zwiększenie intensywności przewietrzania wyrobisk, jednak ten sposób w wielu zakładach będzie trudny do zrealizowania z przyczyn technicznych.

Przedstawione we wprowadzeniu ograniczenia związane ze stosowaniem kolejek podwieszonych z napędem spalinowym przyczyniły się do prowadzenia prac rozwojowych i przemysłowego zastosowania kolejek z napędem akumulatorowym. Budowa samej kolejki jest podobna jak kolejki spalinowej, z tą różnicą, że kolejka posiada sekcję zespołu akumulatora, a silnik spalinowy jest zastąpiony najczęściej kilkoma (4-6) silnikami elektrycznymi asynchronicznymi lub synchronicznymi. Pierwsze ciągniki o napędzie elektrycznym zasilane z akumulatorów opracowane zostały pod koniec XX wieku. Aktualnie można zaobserwować ich dynamiczny rozwój. Do budowy akumulatorów takich maszyn najpowszechniej producenci stosują akumulatory zbudowane z ogniw litowych. Ogniwa akumulatora umieszcza się w obudowie ognioszczelnej. Mogą one być ładowane z sieci, ale mogą być także doładowywane w czasie jazdy, korzystając z systemu rekuperacji energii (np. podczas hamowania w czasie jazdy po upadzie). Najnowocześniejsze rozwiązania ciągników kolejek pozwalają na ładowanie maszyny bezpośrednio z kopalnianej sieci elektroenergetycznej o napięciu 500 V lub 1000 V (Budniok i in. 2021), gdyż ciągnik posiada swoją ładowarkę, która zamknięta jest podobnie jak akumulator w obudowie ognioszczelnej.

Tabela 2. Parametry techniczne ciągnika akumulatorowego CA-190 zasilanego z akumulatora litowego typu VOLTER (Budniok i in. 2021)

Table 2. Technical parameters of the CA-190 locomotive powered by a VOLTER lithium battery (Budniok i in. 2021)

Parametr	Wartość
Siła uciągu	80 kN – 4 napędy cierne
Prędkość maksymalna	2,0 m/s
Minimalny promień skrętu w poziomie	4 m
Minimalny promień skrętu w pionie	8 m
Maksymalne nachylenie toru jezdowego	± 30°
Znamionowe napięcie ładowania (bezpośrednio z sieci zasilającej)	500 V
Typ akumulatora (VOLTER)	litowy
Energia akumulatora	142 kWh
Moc jednego silnika napędowego	11 kW
Moc ciągnika z 4 napędami ciernymi (dwusilnikowymi)	88 kW
Wymiary ciągnika z 4 napędami (wysokość x szerokość x długość)	1275 x 800 x 15340 mm
Masa własna ciągnika z 4 napędami	11 110 kg
Maksymalne nachylenie toru jezdowego	± 30°

Jako przykładowe rozwiązanie nowoczesnej kolejki o napędzie elektrycznym można podać ciągnik Becker-Warkop CA-190. Ciągnik zasilany jest z akumulatora litowego typu VOLTER (o pojemności 142 kWh). Ciągnik posiada 4 dwusilnikowe napędy cierne, o mocy pojedynczego silnika 11 kW, co daje łączną moc napędów na poziomie 88 kW. Prędkość maksymalna ciągnika wynosi 2,0 m/s. Niniejsze parametry wskazują, że kolejka taka może stanowić alternatywę dla kolejek spalinowych, posiadając podobne parametry techniczne. Podstawowe parametry ciągnika kolejki elektrycznej CA-190 produkcji Becker-Warkop zasilanej akumulatorowo przedstawiono w tabeli 2.

3. Analiza spalin z kolejek spalinowych w aspekcie zapewnienia odpowiednich warunków wentylacyjnych

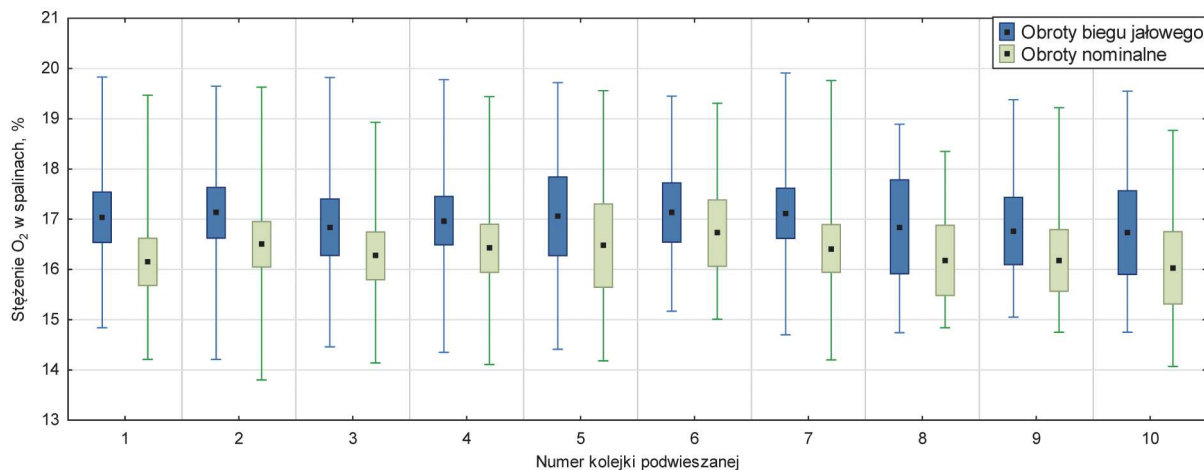
Na podstawie pomiarów spalin nierozrzedzonych prowadzonych cyklicznie w jednej z kopalń węgla kamiennego, zlokalizowanej w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, dokonano analizy ich składu. Pomiarów obejmują okres roczny. Przeprowadzane były dla 10 kolejek podwieszonych będących w użytkowaniu w kopalni. Wśród badanych maszyn znajdowały się następujące modele kolejek:

- Becker-Warkop KP-95;
- Becker-Warkop KP-148;
- Ferrit DLZ 50F;
- Ferrit DLZ 130F;
- Ferrit DLZ 210F.

Przeprowadzone analizy objęły pomiary stężenia tlenu, dwutlenku węgla, tlenku węgla oraz dwutlenku azotu dla obrotów biegu jałowego oraz obrotów nominalnych maszyn. Dodatkowo dokonywano pomiaru temperatury spalin oraz węglowodorów. W przypadku temperatury spalin dla wszystkich badanych kolejek, zawierała się ona w zakresie od 47°C do 49°C, w zależności od prędkości obrotowej silnika. Wykonane analizy wskazują także na to, że w spalinach zawartości węglowodorów były na pomijalnym poziomie. W jednostkowych pomiarach stwierdzano metan, ale o stężeniach rzędu setnych procenta.

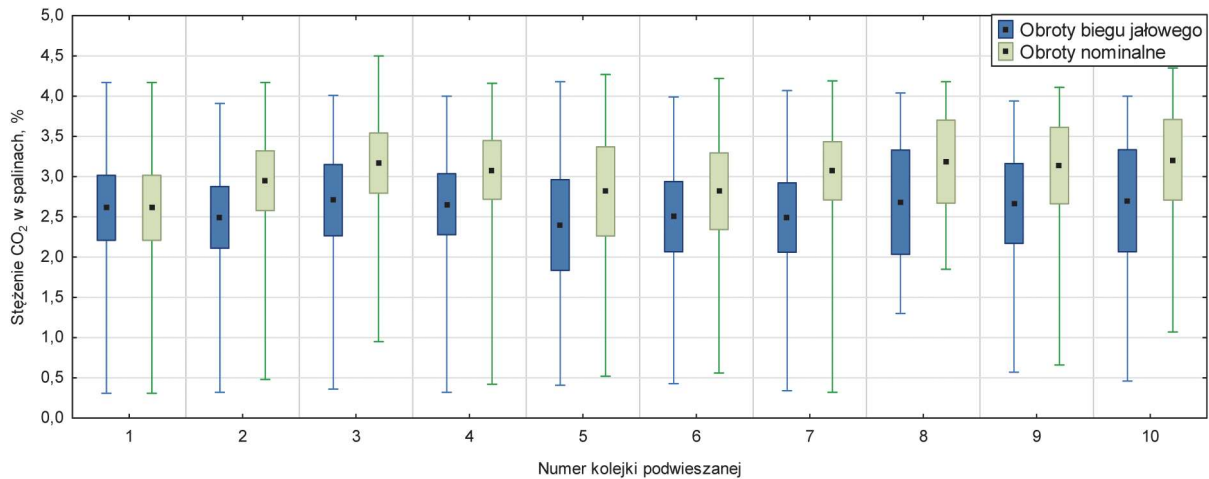
Na rysunkach 3-6 przedstawiono wykresy rejestrowanych stężeń gazów z zastosowaniem wykresów ramkowych, odpowiednio dla tlenu, dwutlenku węgla, tlenku węgla i dwutlenku azotu. Wykresy obejmują cały okres prowadzenia pomiarów, a dane na wykresach zostały pogrupowane z podziałem na poszczególne maszyny i prędkości obrotowe dla każdej z nich. Na wykresach punkt reprezentuje wartość średnią, ramka obrazuje wartości znajdujące się w 95% przedziale ufności, natomiast wąsy wartości minimalną i maksymalną dla danej kolejki.

Przeprowadzone dla wszystkich kolejek analizy wskazują, że stężenia tlenu w spalinach osiągają na wolnych obrotach średnio 17,13%, natomiast na obrotach nominalnych 16,72%. W przypadku dwutlenku węgla stężenia osiągają średnio 2,71% na wolnych obrotach oraz 3,21% na obrotach nominalnych. W przypadku stężenia tlenku węgla wynosiło ono średnio 207 ppm na biegu jałowym i 266 ppm na obrotach

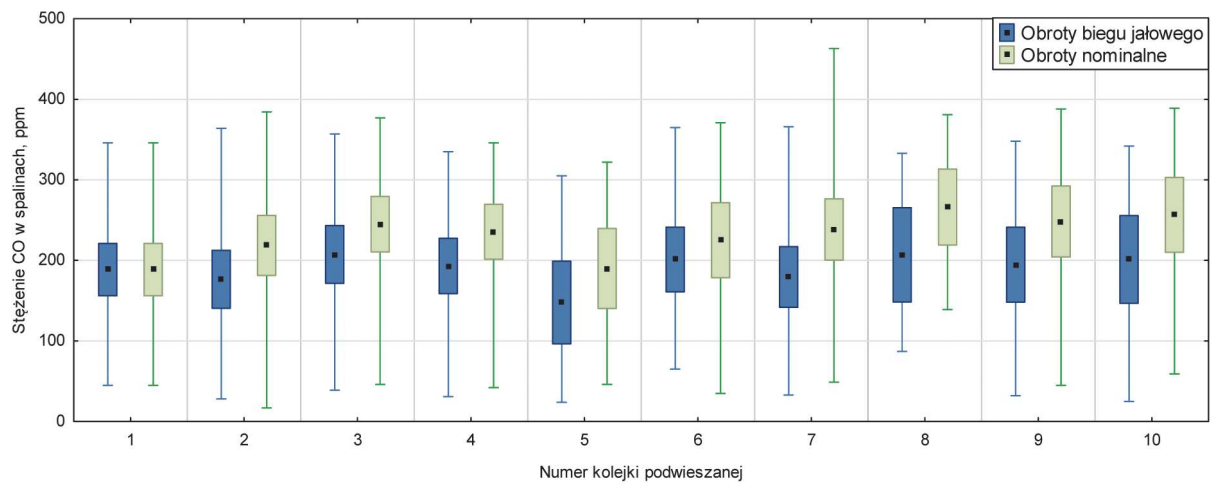


Rys. 3. Wykres stężeń tlenu w spalinach emitowanych w kolejkach podwieszonych

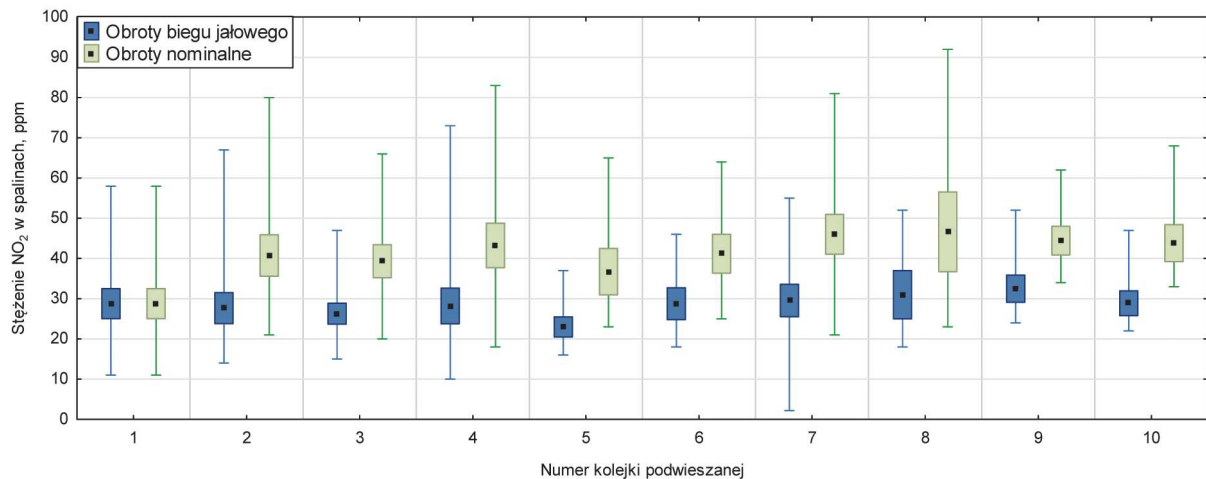
Fig. 3. Graph of O₂ concentrations in exhaust fumes emitted by suspended monorails



Rys. 4. Wykres stężeń dwutlenku węgla w spalinach emitowanych w kolejkach podwieszanych
 Fig. 4. Graph of CO₂ concentrations in exhaust fumes emitted by suspended monorails



Rys. 5. Wykres stężeń tlenku węgla w spalinach emitowanych w kolejkach podwieszanych
 Fig. 5. Graph of CO concentrations in exhaust fumes emitted by suspended monorails



Rys. 6. Wykres stężeń dwutlenku azotu w spalinach emitowanych w kolejkach podwieszanych
 Fig. 6. Graph of NO₂ concentrations in exhaust fumes emitted by suspended monorails

nominalnych. Natomiast rejestrowane stężenia dwutlenku azotu średnio wynosiły 32 ppm na wolnych obrotach i 47 ppm na obrotach nominalnych.

Wykonane pomiary i analiza średnich wartości stężeń gazów szkodliwych w spalinach wskazuje, że w czasie pracy

maszyny w większości przypadków stężenie emitowanych gazów jest dużo niższe niż zakłada polska norma (PKN 1997). Niemniej jednak można zauważyć, że stężenie tlenku węgla niekiedy zbliża się do granicznych wartości przewidzianych w normie.

W wyrobisku z pracującą kolejką spalinową musi być zapewniony wydatek powietrza pozwalający na utrzymanie dopuszczalnych stężeń gazów szkodliwych emitowanych w spalinach (Szlązak 1994). Strumień powietrza niezbędny do rozrzedzenia szkodliwych składników spalin oblicza się jako:

$$V_p = k \cdot q_s \cdot \left(\frac{c_1}{c_{1\text{ dop}}} + \frac{c_2}{c_{2\text{ dop}}} + \dots + \frac{c_n}{c_{n\text{ dop}}} \right), \text{ m}^3/\text{min} \quad (1)$$

gdzie:

- k – współczynnik korekcyjny uwzględniający nierównomierność wymieszania spalin w atmosferze kopalnianej;
- q_s – strumień objętościowy emitowanych spalin, m^3/min ;
- c_i – stężenie i -tego składnika szkodliwego w spalinach, ppm;
- $c_{i\text{ dop}}$ – stężenie dopuszczalne i -tego składnika w atmosferze kopalnianej, ppm.

W oparciu o średnie wartości stężeń gazów uzyskane z pomiarów, z uwzględnieniem 95% przedziału ufności dokonano obliczenia wymaganego strumienia powietrza zgodnie z zależnością (1). Z uwagi na szkodliwość składników spalin dokonano sumowania wymaganego strumienia powietrza dla poszczególnych składników (tlenek węgla i dwutlenek azotu). Dodatkowo uwzględniono współczynnik korekcyjny ($k=1,5$) uwzględniający nierównomierność wydzielania, efektywność rozrzedzania spalin oraz szkodliwość substancji. Wyniki wariantowych obliczeń wymaganego strumienia powietrza dla średnich wartości stężeń CO i NO₂ z pomiarów oraz zmiennego strumienia emitowanych spalin, dla pracy silnika na wolnych obrotach i na obrotach nominalnych przedstawiono w postaci wykresu na rysunku 7. Na rysunku naniesiono przykład wyznaczenia wymaganego strumienia powietrza w zależności od wielkości emisji spalin w kolejkę podwieszoną, dla wydatku spalin wynoszącego 1400 m^3/h .

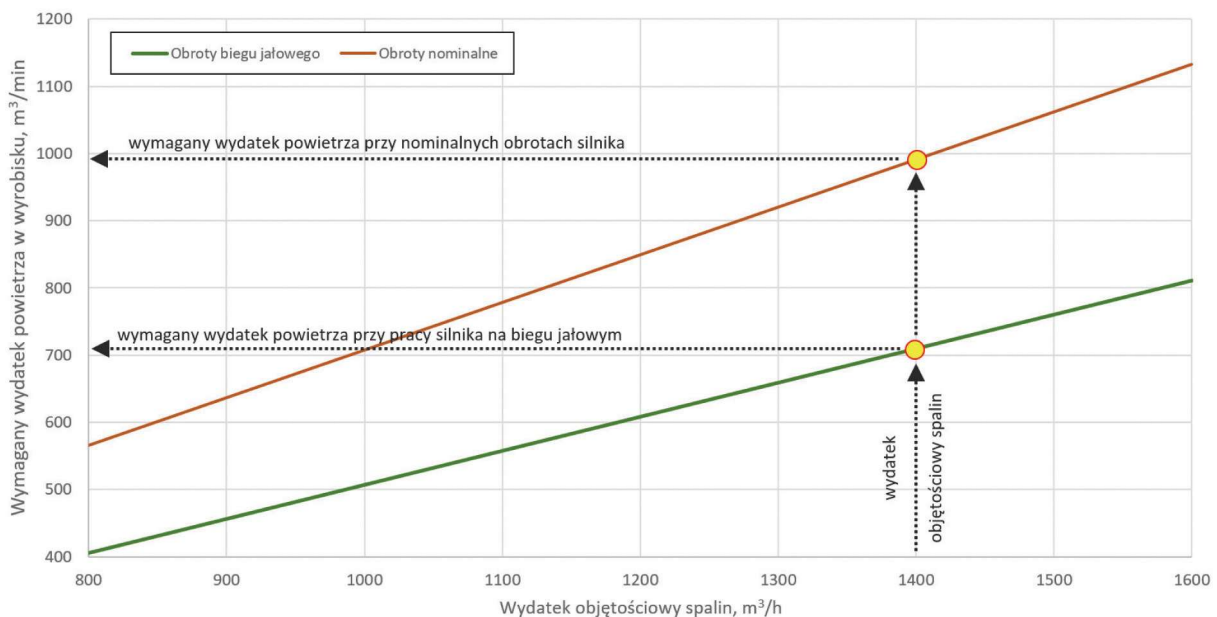
Wydatki powietrza przedstawione na rysunku 7 wskazują, że dla rozrzedzenia szkodliwych składników spalin podczas pracy kolejki w wyrobisku może być potrzebne od 400 do nawet 1100 m^3/min powietrza. Wydatek taki znacząco przekracza wymagany strumień powietrza wynikający z konieczności

zapewnienia wymaganej przepisami prędkości powietrza w wyrobisku w polach metanowych. Przykładowo, dla przekroju 14 m^2 wymagany strumień wynosi 252 m^3/min , a dla przekroju 20 m^2 jest to 360 m^3/min . Wynika z tego, że praca kolejki spalinowej istotnie ingeruje w zapewnienie odpowiednich warunków w wyrobisku. Dla rozrzedzenia emitowanych w spalinach gazów niezbędne jest doprowadzenie strumieni powietrza przekraczających inne kryteria. Zapewnienie odpowiednich warunków wentylacyjnych w dalekich rejonach kopalni może być niekiedy utrudnione.

4. Wpływ pracy kolejek spalinowych i elektrycznych na warunki klimatyczne w wyrobisku

Warunki klimatyczne w wyrobisku kształtowane są przez szereg czynników, zarówno naturalnych, jak i technicznych. W największym stopniu warunki te zależą od głębokości prowadzonej eksploatacji i związanej z nią temperaturą pierwotną górotworu. Poza temperaturą pierwotną górotworu na warunki klimatyczne w wyrobisku wpływa szereg innych czynników, z których najważniejsze to:

- parametry termofizyczne skał otaczających wyrobisko, takie jak współczynnik przewodnictwa cieplnego skał oraz współczynnik wyrównywania poziomów energetycznych (temperatury),
- temperatura powietrza kopalnianego dopływającego do wyrobisk oddziałów wydobywczych,
- czas istnienia wyrobisk doprowadzających powietrze do frontów eksploatacyjnych,
- ciepło pochodzące od maszyn i urządzeń energomaszynowych,
- pracujące w wyrobiskach maszyny górnicze z napędem spalinowym,
- rurociągi transportujące różne media,
- parująca w wyrobisku woda,
- zmiany ciśnienia powietrza podczas przepływu wyrobiskami nachylonymi,
- desorpcja gazów.



Rys. 7. Wymagany strumień powietrza dla średnich wartości stężeń CO i NO₂ z pomiarów oraz zmiennego strumienia emitowanych spalin

Fig. 7. The required airflow for the average values of CO and NO₂ concentrations from measurements and the variable flux of emitted exhaust gases

W artykule przeanalizowano wpływ stosowania kolejek podwieszonych na warunki klimatyczne w wyrobisku. Porównanie wykonano dla kolejki o napędzie spalinowym oraz elektrycznym. Ilość ciepła przekazana do powietrza przez napędy maszyn zależy przede wszystkim od ich mocy, sprawności mechanicznej, sposobu konwersji dostarczonej energii na ciepło oraz od nierównomierności obciążenia w czasie.

W silniku Diesla zachodzi proces wewnętrznego spalania i moc dostarczona do napędu równa jest wartości opałowej paliwa, parokrotnie wyższej od mocy użytecznej silnika. Na ogół maszyny napędzane silnikami Diesla przekazują do otoczenia ok. 3 razy więcej ciepła niż maszyny napędzane silnikami elektrycznymi o takiej samej mocy użytecznej. Wartość opałowa oleju napędowego, który jest paliwem silnika Diesla, wynosi 45,6 MJ/kg. Zużycie paliwa w silnikach wysokoprężnych kolejek podwieszonych wynosi od 210 g/kWh do około 260 g/kWh (średnio 235 g/kWh). Oznacza to, że na 1 kW mocy silnika zużywa paliwo, w którym zawarta jest następująca ilość energii:

$$\frac{0,235 \cdot 45600}{3600} \cong 3,0 \text{ kW}_{\text{paliwo}}/\text{kW}_{\text{silnik}} \quad (2)$$

Obliczona zależnością (2) ilość energii w około 1/3 zamieniana jest na pracę użyteczną maszyny. Pozostałe 2/3 energii oddawane jest do wyrobiska w postaci ciepła przez rozgrzane elementy silnika oraz emisję spalin. Część ciepła wytwarzanego podczas spalania przekazana jest do powietrza w postaci utajonej. W wyniku spalania 1 dm³ oleju napędowego do powietrza wydziela się około 1 kg pary wodnej. Stosowanie maszyn wykorzystujących silniki wysokoprężne znacząco wpływa więc na warunki klimatyczne w wyrobiskach, zarówno w kontekście podnoszenia temperatury powietrza, jak i jego wilgotności.

Pomiary prowadzone w kopalniach niemieckich przez Vob'a (1981) wskazują, że 30% ciepła wydzielanego na skutek pracy maszyn wynosi jest poza wyrobisko z transportowanym urobkiem. Pozostała część w około 10-25% przekazywana jest do powietrza w postaci jawnej, natomiast w około 90-75% w postaci utajonej. Doświadczenia autorów artykułu, wynikające z pomiarów prowadzonych w kopalniach również wskazują na takie przedziały udziałów przyrostu ciepła jawnego i utajonego w wyrobiskach, w których pracują maszyny. Na podstawie przytoczonych zjawisk określona została zależność pozwalająca na wyznaczenie przyrostu wilgotności powietrza spowodowanej pracą napędów oraz urządzeń mechanicznych (Wacławik 2010):

$$\Delta t_m = \frac{0,7 \cdot (0,1 - 0,25) \cdot \Delta Q_m}{\dot{V}_a \cdot \rho_a \cdot c_{pa}} \quad (3)$$

$$\Delta x_m = \frac{0,7 \cdot (0,9 - 0,75) \cdot \Delta Q_m}{\dot{V}_a \cdot \rho_a \cdot r_w} \quad (4)$$

gdzie:

ΔQ_m – energia zamieniona na ciepło w urządzeniu z napędem mechanicznym lub elektrycznym, kW;

\dot{V}_a – strumień objętościowy powietrza przepływającego wyrobiskiem, m³/s;

ρ_a – gęstość powietrza przepływającego wyrobiskiem, kg/m³;

c_{pa} – ciepło właściwe powietrza, kJ/(kg·K);

r_w – ciepło parowania wody, kJ/kg.

W przypadku maszyn elektrycznych część energii napędu zamienia się w ciepło bezpośrednio w silniku. Proces ten określa sprawność urządzenia, a zewnętrznym jego objawem jest wyższa temperatura silnika w porównaniu z temperaturą otoczenia. Sprawność silników elektrycznych zależy od ich budowy, prędkości obrotowej, mocy i obciążenia w stosunku

do mocy nominalnej. Silniki asynchroniczne pierścieniowe i klatkowe w pełni obciążone, o mocy nominalnej rzędu setek kW, charakteryzują się sprawnością przekraczającą 90%. W silnikach występują straty w uzwojeniu i w obwodzie magnetycznym (tzw. straty w miedzi i w żelazie). Straty w uzwojeniu zwykle są największe i zmieniają się z kwadratem natężenia prądu. Przy spadku obciążenia silnika w stosunku do mocy nominalnej jego sprawność zmniejsza się.

W przypadku niepełnego obciążenia maszyn można wprowadzić współczynnik nierównomierności pracy silnika, równy stosunkowi czasu pracy silnika do czasu zmiany roboczej.

5. Porównanie warunków klimatycznych w wyrobisku chodnikowym podczas pracy kolejki spalinowej i elektrycznej

W artykule przeprowadzono analizę porównawczą wpływu pracy kolejki podwieszanej na warunki klimatyczne w dążonym wyrobisku chodnikowym. W tym celu wykonano prognozę warunków klimatycznych dla referencyjnego 1000 m wyrobiska chodnikowego, wykonywanego w obudowie ŁP o przekroju 17,8 m², z wentylacją lutniową tłoczącą. W prognozie uwzględniono zarówno zmianę temperatury, jak i wilgotności powietrza. Analizę wykonano dla wyrobiska, w którym w normalnym stanie bez pracy kolejki utrzymana jest na całej długości temperatura 28°C;

Prognozę prowadzono w odcinkach 100 m, uwzględniając przy tym szczelność lutniociągu oraz zmiany parametrów powietrza w wyrobisku. Przyjęto odpowiedni czas istnienia wyrobiska na poszczególnych jego odcinkach, uwzględniając postęp przodka. W wyrobisku przyjęto pracę maszyn elektrycznych oraz transformatorów. Prognozę wykonano w następującej kolejności:

- prognoza dla wyrobiska bez pracującej kolejki podwieszanej,
- prognoza dla wyrobiska z założeniem pracy kolejki spalinowej o mocy 95 kW,
- prognoza dla wyrobiska z założeniem pracy kolejki elektrycznej o łącznej mocy silników 95 kW.

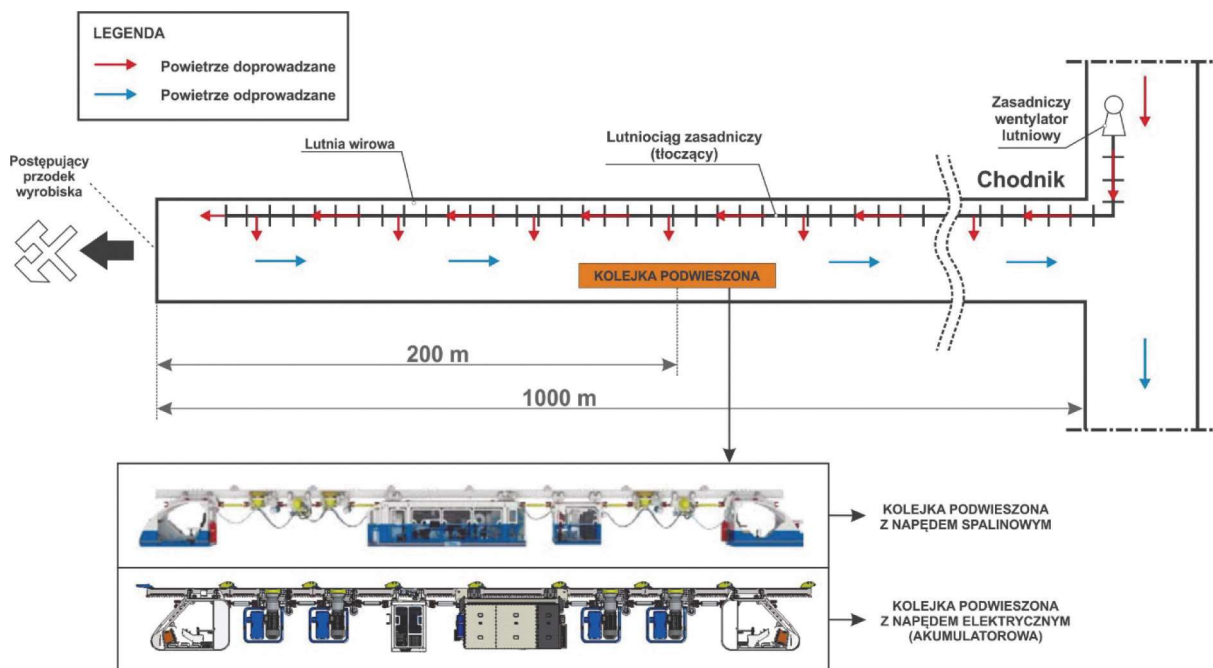
Obraz sytuacji w analizowanym wyrobisku przedstawiono na rysunku 8, na którym zaznaczono kierunek przepływu powietrza oraz lokalizację kolejki podwieszanej.

W obliczeniach uwzględniono ciągłą pracę kolejki w wyrobisku. Uwzględniono, że 20% ciepła wytwarzanego przez maszynę jest przekazywana do powietrza w postaci jawnej, natomiast 80% w postaci utajonej. Założono dodatkowo, że ciepło powstałe w czasie pracy kolejki nie jest wynoszone z wyrobiska wraz z urobkiem, czyli uwzględniono maksymalny możliwy przyrost ciepła w wyrobisku. Przyrost temperatury powietrza oraz wilgotności obliczono zgodnie z zależnościami (3) i (4).

Dla każdego z przypadków wykonano obliczenia zwiększenia strumienia ciepła w wyrobisku w związku z pracą kolejki podwieszanej. Uwzględniono zarówno przyrost ciepła jawnego, jak i utajonego w przypadku kolejki spalinowej.

Parametry techniczne, wentylacyjne oraz charakterystykę czynników wpływających na zagrożenie klimatyczne dla wyrobiska chodnikowego analizowanego przedstawiono w tabeli 3. Graficzne zestawienia prognoz temperatury oraz wilgotności powietrza dla analizowanych wariantów (bez pracy kolejki oraz z pracą kolejki spalinowej lub elektrycznej) przedstawiono na rysunku 9.

Analiza wykonanych obliczeń wskazuje, że w przypadku kolejki spalinowej przyrost ciepła spowodowany jej pracą w wyrobisku wynosi około 169 kW. Przy czym przyrost ciepła jawnego to około 21 kW, a pozostała ilość ciepła, to ciepło



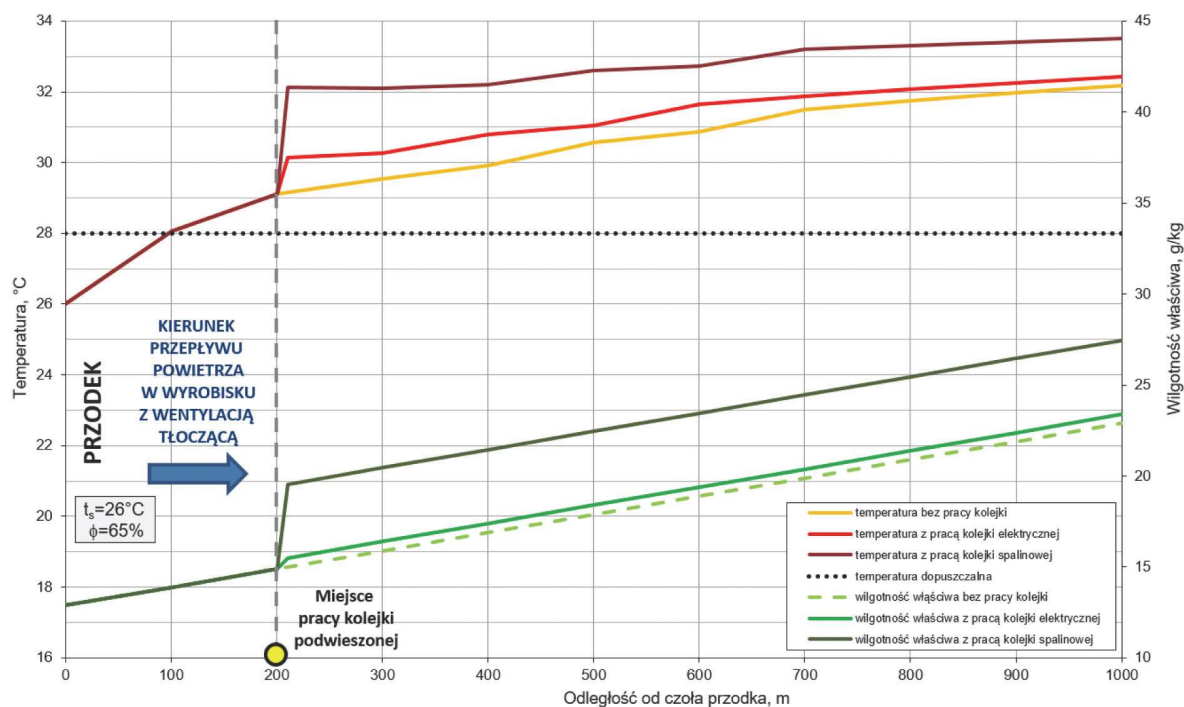
Rys. 8. Schemat ogólny analizowanego wyrobiska

Fig. 8. Layout of the analyzed excavation

Tabela 3. Charakterystyka analizowanego wyrobiska chodnikowego

Table 3. Characteristics of the analyzed roadway

Lp.	Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
1	Długość wyrobiska	1000	m
2	Przekrój poprzeczny wyrobiska	17,8	m ²
3	Wydatek powietrza w przodku wyrobiska	600	m ³ /min
4	Wydajność zasadniczego wentylatora lutniowego	800	m ³ /min
5	Temperatura pierwotna górotworu	32	°C
6	Moc maszyn pracujących w strefie przodkowej	300	kW
7	Temperatura powietrza w przodku wyrobiska	25	°C
8	Wilgotność względna powietrza w przodku wyrobiska	65	%



Rys. 9. Prognoza temperatury i wilgotności powietrza w wyrobisku dla analizowanych wariantów

Fig. 9. Forecast of air temperature and humidity in the roadway without and with the operation of suspended monorail

utajone. Temperatura powietrza na wylocie z wyrobiska wzrosła o 1,3°C, natomiast zawartość wilgoci w powietrzu o około 4,6 g/kg powietrza suchego, co przełożyło się na istotny wzrost wilgotności względnej (większa o około 16%). W przypadku kolejki elektrycznej przyrost ciepła w oddziale wynosi łącznie 18 kW, przy czym przyrost ciepła jawnego stanowi niespełna 2,5 kW, a pozostała część to ciepło utajone. Zgodnie z wykonaną prognozą temperatura powietrza na wylocie z wyrobiska wzrosła o około 0,1°C, natomiast zawartość wilgoci w powietrzu o około 0,5 g/kg powietrza suchego. W związku ze wzrostem temperatury i zawartości wilgoci wilgotność względna powietrza na wylocie z wyrobiska praktycznie nie zmieniła się w stosunku do przypadku bez pracy kolejki. Wykonane porównanie wskazuje na możliwość zapewnienia korzystniejszych warunków klimatycznych w wyrobisku dzięki zastosowaniu kolejki o napędzie elektrycznym w stosunku do kolejki o napędzie spalinowym.

6. Wnioski i podsumowanie

Wykonane w ramach artykułu analizy pracy kolejek podwieszonych w wyrobisku górniczym, ze szczególnym uwzględnieniem warunków klimatycznych oraz wydzielania zanieczyszczeń pozwalają stwierdzić, zastosowanie kolejek elektrycznych zasilanych akumulatorowo, w miejsce kolejek spalinowych wpływa korzystnie na warunki mikroklimatu wyrobiska oraz poprawę jakości powietrza.

Wysoka sprawność napędów elektrycznych powoduje, że wydzielają one zdecydowanie mniejszą ilość ciepła do wyrobiska w stosunku do kolejek spalinowych. W ramach artykułu wykonano analizy porównawcze przyrostu ciepła, dla 1000 m, drążonego wyrobiska chodnikowego, w którym panują trudne warunki klimatyczne. Dla analizowanego przypadku przyrost temperatury na wylocie z wyrobiska związany z pracą kolejki spalinowej wyniósł 1,3°C. W przypadku kolejki elektrycznej jest to około 0,1°C.

Jedną z niekwestionowanych zalet kolejek elektrycznych jest brak wydzielania pary wodnej, która zwiększa zawartość wilgoci w powietrzu. W przypadku konieczności stosowania chłodzenia powietrza w wyrobiskach jego wilgotność ma kluczowe znaczenie. W przypadku kiedy jest ona wysoka, większa część mocy chłodniczej zabudowanych chłodziń układu klimatyzacji jest przeznaczana na obniżenie wilgotności powietrza (osuszanie powietrza), niż na obniżenie temperatury. Całkowity przyrost ciepła (jawnego i utajonego) dla analizowanego przypadku wyniósł odpowiednio dla kolejki spalinowej i elektrycznej 169 kW i 18 kW.

Zastosowanie kolejek elektrycznych pozwala także wyeliminować emisję gazów szkodliwych do powietrza wentylacyjnego, co znacząco poprawia jakość powietrza w wyrobiskach. Dzięki temu możliwe jest także zmniejszenie strumienia powietrza w wybranych wyrobiskach, oczywiście jeżeli jest to możliwe w związku z innymi wymaganiami obowiązujących przepisów, czy też występowaniem zagrożeń naturalnych.

W związku z przedstawionymi w ramach porównania zaletami kolejek elektrycznych w stosunku do kolejek spalinowych należy się spodziewać, że w najbliższych latach będą one stopniowo zastępować pracujące w kopalniach kolejki spalinowe.

Literatura

BECKER-WARKOP SP. Z O.O. 2022 - Materiały techniczno-handlowe producenta kolejek podwieszonych. https://www.becker-mining.com.pl/do_pobrania/MineTrans.pdf (dostęp w dniu 4.10.2022).

- BUDNIOK T., KONSEK R., KRAKOWCZYK B., TOR A., ZASADNI W., ŻYREK L. 2021 - An innovative CA-190 monorail battery locomotive powered by a VOLTER lithium battery. *Mining Informatics Automation and Electrical Engineering*, 59, s. 69–74.
- FUKSA D., KĘSEK M., ŚLÓSZARZ M., BATOR A. 2015 - Koncepcja zintegrowanego systemu transportu poziomego w kopalniach węgla kamiennego. „Przeгляд Górnicy”, 71, nr 8, s. 25-27.
- PIECZORA E., SUFFNER H. 2017 - Rozwój napędów dołowych kolejek podwieszonych. „Maszyny Górnicze”, nr 3, s. 83-91.
- PIECZORA E., TOKARCZYK J. 2017 - Rozwój transportu podziemnego wykorzystującego kolejki podwieszane. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*, 532, nr 4, s. 107-117.
- Polski Komitet Normalizacyjny (PKN) 1997 - PN-G-36000:1997. Napędy spalinowe dla podziemnych pojazdów górniczych – Wymagania. PKN, Warszawa.
- Polski Komitet Normalizacyjny (PKN) 1999 - PN-G-36001:1999. Napędy spalinowe dla podziemnych pojazdów górniczych – Badania. PKN, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2017 poz. 1118 wraz z późniejszymi zmianami).
- Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. 2018 poz. 1286 wraz z późniejszymi zmianami).
- SZŁĄŻAK N. 1994 - Rozprzestrzenianie się gazów spalinowych w wyrobiskach górniczych w świetle badań teoretycznych i doświadczalnych. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- SZŁĄŻAK N., BOROWSKI M., SPORYSZ G. 2014 - Analiza składników spalin z silników spalinowych maszyn samojezdnych w podziemnych kopalniach. „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie”, nr 12, s. 6-12.
- SZŁĄŻAK, N.; KORZEC, M.; CHENG, J. 2022 - Using Battery-Powered Suspended Monorails in Underground Hard Coal Mines to Improve Working Conditions in the Roadway. *Energies*, 15, 7527.
- VOB J. 1981 - Grubenklimate. Verlag Glucauf, T.27, Essen.
- WAĆLAWIK J. 2010 - Wentylacja Kopalń. Wydawnictwa AGH, Kraków.

Artykuł wpłynął do redakcji w październiku 2022 r.
Artykuł zatwierdzono do druku 9.11.2022 r.

Nikodem Szlązak prof. dr hab. inż., specjalizacja: wentylacja kopalń, zagrożenia aerologiczne, zwalczanie zagrożeń, profesor, zatrudniony w Katedrze Inżynierii Środowiska, Wydziału Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: szlazak@agh.edu.pl

Marek Korzec dr inż. specjalizacja: wentylacja kopalń, zagrożenia aerologiczne, zwalczanie zagrożeń, adiunkt, zatrudniony w Katedrze Inżynierii Środowiska, Wydziału Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: mkorzec@agh.edu.pl